

---

# Machines électriques

André Genon  
Willy Legros

hermes

---

EET 46

# Machines électriques

23504  $\frac{1}{2}$

André Genon

Willy Legros



**Hermès**  
**Science**  
— publications —

## Table des matières

<b>Avant-propos</b> .....	15
<b>Liste des symboles</b> .....	17
1. Convention générale .....	17
2. Symboles généraux .....	17
3. Symboles particuliers.....	19
Chapitre 1 .....	19
Chapitre 2 .....	20
Chapitre 3 .....	21
Chapitre 4 .....	21
Chapitres 5 et 6.....	23
Chapitre 7 .....	25
Annexe 1 .....	26
Annexe 2 .....	27
<b>Chapitre 1. Introduction</b> .....	29
1.1. Rappel des lois fondamentales de l'électromagnétisme .....	29
1.1.1. Les équations de Maxwell .....	29
1.1.2. Approximation électrotechnique des équations de Maxwell .....	30
1.1.2.1. Loi de Maxwell-Ampère.....	31
1.1.2.2. Conservation du flux d'induction magnétique .....	33
1.1.2.3. Loi de Faraday .....	33
1.1.2.4. Relation matérielle magnétique .....	35
1.1.2.5. Loi d'Ohm .....	37
1.1.3. Inductances propres et mutuelles.....	37
1.1.4. Energie magnétique .....	38
1.1.5. Loi de Laplace .....	39

1.2. Circuits magnétiques.....	39	2.2. Transformateurs triphasés.....	75
1.2.1. Circuits magnétiques idéaux.....	40	2.2.1. Modes de construction.....	75
1.2.2. Circuits magnétiques réels.....	43	2.2.2. Fonctionnement.....	78
1.3. Pertes magnétiques.....	45	2.3. Transformateurs de mesure.....	78
1.3.1. Pertes par hystérésis.....	45	2.3.1. Principe et utilisation.....	78
1.3.2. Pertes par courants de Foucault.....	45	2.3.2. Transformateur de tension.....	81
1.4. Régimes sinusoïdaux.....	46	2.3.3. Transformateur de courant.....	82
1.4.1. Représentation complexe des grandeurs sinusoïdales.....	46	<b>Chapitre 3. Bobinages triphasés et champs glissants.....</b>	<b>85</b>
1.4.2. Grandeurs électriques. Impédances.....	47	3.1. Introduction.....	85
1.4.3. Circuits électriques triphasés équilibrés.....	49	3.2. Constitution des bobinages triphasés.....	85
1.4.4. Systèmes unitaire et en pour-cent.....	51	3.2.1. Enroulement à un étage à m encoches par pôle et par phase.....	85
1.4.4.1. Réseaux monophasés.....	51	3.2.2. Enroulement à deux étages.....	89
1.4.4.2. Réseaux triphasés.....	52	3.3. Force magnétomotrice produite dans l'entrefer.....	89
1.4.4.3. Avantage du système.....	53	3.3.1. Force magnétomotrice générée par une phase du bobinage.....	89
<b>Chapitre 2. Transformateurs.....</b>	<b>55</b>	3.3.2. Force magnétomotrice produite par un bobinage triphasé parcouru par des courants triphasés sinusoïdaux.....	92
2.1. Transformateurs monophasés.....	55	3.3.3. Force magnétomotrice produite par un bobinage monophasé parcouru par un courant sinusoïdal.....	95
2.1.1. Principe de fonctionnement.....	55	3.4. Evaluation du flux par pôle.....	97
2.1.2. Relations générales.....	56	3.5. Forces électromotrices induites dans un bobinage triphasé.....	98
2.1.2.1. Conventions de signes.....	56	3.6. Représentation vectorielle des champs magnétiques.....	101
2.1.2.2. Equation du primaire.....	56	3.7. Expression générale du couple dans les machines à courants alternatifs.....	103
2.1.2.3. Equation du secondaire.....	57	3.7.1. Cas d'un bobinage triphasé.....	103
2.1.2.4. Equation de liaison.....	58	3.7.2. Approche vectorielle.....	105
2.1.2.5. Remarque.....	59	3.7.3. Cas d'un bobinage monophasé.....	108
2.1.3. Schéma équivalent.....	60	<b>Chapitre 4. Machines asynchrones.....</b>	<b>111</b>
2.1.4. Equations et schéma équivalent en régime sinusoïdal.....	61	4.1. Description.....	111
2.1.5. Propriétés fondamentales.....	62	4.1.1. Rotor bobiné.....	112
2.1.5.1. Ordres de grandeur.....	62	4.1.2. Rotor à cage.....	112
2.1.5.2. Fonctionnement à vide.....	62	4.2. Principe de fonctionnement.....	113
2.1.5.3. Fonctionnement en court-circuit.....	63	4.3. Equations générales.....	115
2.1.5.4. Fonctionnement en charge. Schéma équivalent simplifié.....	65	4.3.1. Conventions de signes.....	115
2.1.5.5. Caractéristique extérieure du transformateur.....	66	4.3.2. Induction magnétique dans l'entrefer. Forces électromotrices induites dans le stator et dans le rotor.....	115
2.1.5.5.1. Cas d'une charge purement résistive : $\varphi_2 = 0$ .....	68	4.3.3. Réactances de fuite.....	117
2.1.5.5.2. Cas d'une charge inductive : $\varphi_2 > 0$ .....	69	4.3.4. Equation du stator.....	118
2.1.5.5.3. Cas d'une charge capacitive : $\varphi_2 < 0$ .....	70	4.3.5. Equation du rotor.....	118
2.1.6. Modes de construction des transformateurs.....	70	4.3.6. Equation de liaison.....	119
2.1.7. Influence de la saturation, de l'hystérésis et des courants de Foucault.....	72	4.4. Schéma équivalent.....	121
2.1.8. Détermination expérimentale des valeurs des éléments du schéma équivalent.....	74	4.4.1. Etablissement du schéma équivalent.....	121
2.1.8.1. Essai à vide.....	74	4.4.2. Schéma équivalent simplifié.....	123
2.1.8.2. Essai en court-circuit.....	74		

4.4.3. Détermination expérimentale des éléments du schéma équivalent...	123	5.1.3. Principe de fonctionnement de l'alternateur.....	171
4.4.3.1. Essai à vide.....	123	5.1.4. Conventions de signes.....	172
4.4.3.2. Essai en court-circuit.....	124	5.2. Machines synchrones à pôles lisses.....	173
4.5. Couple, puissance et rendement.....	125	5.2.1. Diagrammes vectoriels.....	173
4.5.1. Expressions du couple et de la puissance.....	125	5.2.2.1. Diagramme des forces magnétomotrices et des tensions.....	173
4.5.2. Rendement.....	127	5.2.1.2. Diagramme de Potier – Réaction d'induit.....	178
4.6. Caractéristique mécanique.....	129	5.2.1.3. Diagramme vectoriel simplifié. Méthode de Behn-Eschenburg. Schéma équivalent.....	181
4.6.1. Etablissement de la caractéristique mécanique.....	129	5.2.2. Détermination expérimentale des paramètres caractéristiques.....	184
4.6.2. Zone de fonctionnement stable.....	131	5.2.2.1. Force électromotrice à vide.....	184
4.6.2.1. Charge à couple constant.....	131	5.2.2.2. Détermination de la réactance $X_f$ et de $\delta/\gamma$ .....	184
4.6.2.2. Charge à couple croissant avec la vitesse de rotation.....	132	5.2.2.2.1. Caractéristique en déwatté.....	185
4.6.3. Fonctionnement en génératrice asynchrone.....	133	5.2.2.2.2. Détermination expérimentale de $X_f$ et de $\delta/\gamma$ .....	186
4.6.4. Démarrage du moteur asynchrone.....	133	5.2.2.3. Détermination de la réactance synchrone.....	187
4.6.4.1. Cas des moteurs asynchrones à cage.....	134	5.2.2.3.1. Caractéristique en court-circuit.....	188
4.6.4.2. Cas des moteurs asynchrones à rotor bobiné.....	135	5.2.2.3.2. Détermination de la réactance synchrone.....	190
4.6.5. Inversion du sens de rotation d'un moteur asynchrone.....	135	5.2.3. Expressions du couple.....	191
4.7. Diagramme du cercle.....	136	5.2.4. Fonctionnement d'un alternateur isolé alimentant un réseau local... 5.2.4.1. Charge purement résistive ( $\varphi = 0$ ).....	192 194
4.7.1. Etablissement du diagramme.....	136	5.2.4.2. Charge inductive ( $\varphi > 0$ ).....	194
4.7.2. Zones de fonctionnement.....	140	5.2.4.3. Charge capacitive ( $\varphi < 0$ ).....	195
4.8. Réglage de la vitesse des moteurs asynchrones.....	141	5.2.5. Alternateur connecté à un réseau de tension et de fréquence constantes.....	196
4.8.1. Modification de la résistance rotorique.....	141	5.2.5.1. Utilité de l'interconnexion des centrales électriques.....	196
4.8.2. Modification de la tension d'alimentation.....	142	5.2.5.2. Mise en parallèle d'un alternateur sur un réseau électrique.....	198
4.8.3. Modification de la fréquence.....	143	5.2.5.3. Mise en charge de la machine.....	199
4.8.4. Commande vectorielle des moteurs asynchrones.....	145	5.2.5.4. Stabilité statique.....	201
4.9. Moteurs asynchrones triphasés spéciaux.....	150	5.2.5.5. Diagramme des puissances.....	202
4.9.1. Rotor à double cage.....	150	5.2.5.6. Courbes en V ou de Mordey.....	204
4.9.2. Rotor à effet pelliculaire.....	153	5.3. Machines synchrones à pôles saillants.....	207
4.10. Moteur asynchrone monophasé.....	158	5.3.1. Diagramme vectoriel.....	207
4.10.1. Principe de fonctionnement.....	158	5.3.1.1. Etablissement du diagramme. Méthode de Blondel.....	208
4.10.2. Schéma équivalent.....	160	5.3.1.2. Détermination du courant d'excitation.....	209
4.10.2.1. Forces électromotrices statoriques et rotoriques.....	160	5.3.1.3. Simplification du diagramme vectoriel.....	211
4.10.2.2. Equations de liaison.....	161	5.3.2. Expression du couple.....	214
4.10.2.3. Equation du stator.....	163	5.4. Rendement des machines synchrones.....	216
4.10.2.4. Equations du rotor.....	164	5.5. Capacité d'une machine synchrone.....	217
4.10.2.5. Schéma équivalent.....	164		
4.10.3. Caractéristique mécanique.....	166		
4.10.4. Moteur asynchrone monophasé à phase auxiliaire.....	166		
4.10.5. Démarrage au moyen d'une spire de Fraeger.....	168		
<b>Chapitre 5. Génératrices synchrones ou alternateurs.....</b>	<b>169</b>		
5.1. Introduction.....	169	<b>Chapitre 6. Moteurs synchrones.....</b>	<b>219</b>
5.1.1. Domaines d'application des machines synchrones.....	169	6.1. Introduction.....	219
5.1.2. Description de la machine.....	170	6.1.1. Principe de fonctionnement d'un moteur synchrone triphasé.....	219
		6.1.2. Conventions de signes.....	219

6.2. Moteurs synchrones à pôles lisses.....	220	7.8.1. Moteurs shunt et à excitation indépendante.....	262
6.2.1. Diagrammes vectoriels.....	220	7.8.1.1. Caractéristique mécanique.....	263
6.2.1.1. Diagramme de Potier.....	220	7.8.1.2. Zone d'utilisation.....	265
6.2.1.2. Diagramme vectoriel simplifié. Méthode de Behn-Eschenburg. Schéma équivalent.....	222	7.8.1.3. Influence du courant d'excitation.....	266
6.2.2. Expressions du couple.....	223	7.8.1.4. Influence de la tension d'induit.....	267
6.2.3. Moteur synchrone branché sur un réseau à tension et fréquence constantes.....	224	7.8.1.5. Utilisation des moteurs shunt et à excitation indépendante.....	270
6.2.3.1. Remarques préliminaires.....	224	7.8.1.6. Fonctionnement en récupération.....	270
6.2.3.2. Démarrage du moteur synchrone.....	224	7.8.2. Moteur série.....	271
6.2.3.2.1. Utilisation d'un moteur auxiliaire.....	224	7.8.2.1. Caractéristique mécanique.....	272
6.2.3.2.2. Démarrage en asynchrone.....	224	7.8.2.1.1. Cas de la machine non saturée.....	272
6.2.3.3. Diagramme des puissances.....	225	7.8.2.1.2. Cas de la machine saturée.....	273
6.2.3.4. Courbes en V ou de Mordey.....	226	7.8.2.1.3. Cas de la machine réelle.....	275
6.2.3.5. Fonctionnement comme compensateur synchrone.....	227	7.8.2.2. Zone d'utilisation.....	275
6.3. Moteurs synchrones à pôles saillants.....	227	7.8.2.3. Influence de la tension d'alimentation.....	276
6.3.1. Diagrammes vectoriels.....	227	7.8.2.4. Shuntage de l'inducteur.....	277
6.3.1.1. Diagramme de Blondel.....	227	7.8.2.5. Utilisation du moteur série.....	278
6.3.1.2. Diagramme vectoriel simplifié.....	228	7.8.2.6. Fonctionnement en freinage.....	279
6.3.2. Expression du couple.....	229	7.8.3. Moteur compound.....	280
6.4. Moteurs synchrones à aimants permanents.....	230	7.8.3.1. Caractéristique mécanique.....	281
6.5. Moteurs à réluctance variable.....	233	7.8.3.2. Utilisation du moteur compound.....	283
6.6. Rendement du moteur synchrone.....	234	7.9. Démarrage des moteurs à courant continu.....	284
6.7. Moteur synchrone à vitesse variable.....	235	7.9.1. Comparaison du couple de démarrage des moteurs à courant continu.....	284
6.7.1. Introduction.....	235	7.9.2. Méthodes de démarrage.....	285
6.7.2. Moteur synchrone autopiloté.....	235	7.9.2.1. Cas du moteur shunt.....	285
6.7.3. Moteur synchrone alimenté par un onduleur de tension. Moteur à courant continu sans balai (brushless).....	238	7.9.2.2. Cas du moteur série.....	287
<b>Chapitre 7. Moteurs à courant continu.....</b>	<b>241</b>	7.9.3. Inversion du sens de rotation.....	287
7.1. Description d'une machine à courant continu.....	241	/ 7.10. Rendement des machines à courant continu.....	289
7.2. Principe de fonctionnement des moteurs à courant continu.....	244	7.10.1. Pertes mécaniques.....	289
7.3. Bobinage de l'induit.....	246	7.10.2. Pertes magnétiques.....	289
7.4. Caractéristique à vide des machines à courant continu.....	251	7.10.3. Pertes électriques.....	290
7.5. Tension aux bornes du moteur en charge.....	252	7.10.4. Pertes supplémentaires.....	290
7.6. Réaction d'induit.....	254	7.11. Moteur série alimenté par du courant alternatif. Moteur universel.....	290
7.6.1. Balais disposés dans l'axe des pôles.....	254	7.11.1. Principe.....	290
7.6.2. Compensation de la réaction d'induit. Enroulement de compensation.....	258	7.11.2. Mise en équations.....	291
7.6.3. Balais décalés par rapport à l'axe des pôles.....	259	7.11.3. Diagramme du cercle.....	291
/ 7.7. Expression du couple.....	261	7.11.4. Couple.....	293
7.8. Caractéristiques des moteurs à courant continu.....	262	7.11.5. Utilisation.....	294
		<b>Annexe 1. Bobinages polyphasés et champs glissants.....</b>	<b>295</b>
		A1.1. Avertissement.....	295
		A1.2. Constitution des bobinages polyphasés.....	295
		A1.2.1. Enroulement à un étage à m encoches par pôle et par phase.....	295
		A1.2.1.1. Disposition des conducteurs dans les encoches.....	295

A1.2.1.2. Disposition des têtes de bobines .....	297
A1.2.1.2.1. Enroulement concentrique avec têtes de bobines sur trois rangs .....	297
A1.2.1.2.2. Enroulement concentrique avec têtes de bobines sur deux rangs .....	298
A1.2.1.2.3. Bobinage Alioth .....	299
A1.2.2. Enroulement à deux étages .....	299
A1.2.2.1. Enroulement imbriqué diamétral.....	300
A1.2.2.2. Enroulement imbriqué à pas raccourcis .....	300
A1.2.2.3. Enroulement ondulé .....	301
A1.3. Force magnétomotrice produite dans l'entrefer .....	302
A1.3.1. Rappel : les ondes mobiles .....	302
A1.3.2. Force magnétomotrice produite par une phase du bobinage.....	303
A1.3.2.1. Bobinage diamétral à une encoche par pôle et par phase.....	303
A1.3.2.2. Bobinage diamétral à m encoches par pôle et par phase.....	305
A1.3.2.2.1. Force magnétomotrice fondamentale .....	306
A1.3.2.2.2. Forces magnétomotrices harmoniques .....	307
A1.3.2.3. Bobinage à pas raccourcis.....	308
A1.3.2.3.1. Force magnétomotrice fondamentale .....	309
A1.3.2.3.2. Forces magnétomotrices harmoniques .....	310
A1.3.2.4. Une phase du bobinage est parcourue par du courant sinusoïdal .....	311
A1.3.2.4.1. Force magnétomotrice fondamentale .....	311
A1.3.2.4.2. Forces magnétomotrices harmoniques .....	313
A1.3.2.5. Remarque concernant les bobinages monophasés.....	314
A1.3.3. Force magnétomotrice produite par un bobinage polyphasé parcouru par des courants polyphasés sinusoïdaux .....	315
A1.3.3.1. Cas général.....	315
A1.3.3.1.1. Force magnétomotrice fondamentale .....	315
A1.3.3.1.2. Forces magnétomotrices harmoniques .....	316
A1.3.3.2. Cas du bobinage triphasé .....	318
A1.3.4. Résumé .....	318
A1.3.5. Intérêt de multiplier le nombre d'encoches par pôle et par phase..	319
A1.3.6. Intérêt du raccourcissement de pas .....	321
A1.3.7. Evaluation du flux par pôle.....	321
A1.4. Forces électromotrices induites dans un bobinage polyphasé .....	323
A1.5. Représentation vectorielle des champs magnétiques.....	327
A1.6. Expression générale du couple dans les machines à courants alternatifs .....	330
A1.6.1. Approche temporelle .....	330
A1.6.1.1. Cas où $q$ est différent de 1 ou 2.....	332
A1.6.1.2. Cas où $q$ est égal à 1 ou 2.....	333
A1.6.2. Approche vectorielle.....	334

<b>Annexe 2. Commutation des machines à courant continu .....</b>	<b>339</b>
A2.1. Approche physique du problème.....	339
A2.1.1. Les balais ont exactement la largeur d'une lame du collecteur .....	340
A2.1.2. Les balais sont plus larges qu'une lame du collecteur .....	343
A2.2. Equation de la commutation pour un enroulement parallèle .....	345
A2.2.1. Les balais ont exactement la largeur d'une lame du collecteur .....	345
A2.2.2. Les balais sont plus larges qu'une lame du collecteur .....	347
A2.3. Amélioration de la commutation.....	348
A2.3.1. Décalage des balais.....	348
A2.3.2. Pôles auxiliaires de commutation .....	349

---

La qualité de la conceptualisation, de la réalisation et de l'évaluation du matériel électrique prend une importance grandissante dans un environnement de plus en plus marqué par la technologie. Dans ce contexte, *Machines électriques* offre une approche claire et des outils de compréhension fiables des phénomènes électromagnétiques.

On y trouvera ainsi, non seulement le rappel de la théorie et des lois fondamentales de l'électromagnétisme, mais aussi leur mise en relation constante avec la réalisation concrète des différents types de machines électriques : synchrones, asynchrones et à courant continu.

Cet ouvrage est destiné aux techniciens spécialisés en électromécanique, aux étudiants ingénieurs quelle que soit leur orientation, ainsi qu'à ceux qui ont une formation générale et désirent approfondir leurs connaissances en électricité ou en électromécanique.

#### *Les auteurs*

André Genon est chargé de cours à la faculté des sciences appliquées de l'Université de Liège.

Willy Legros est professeur à la faculté des sciences appliquées de l'Université de Liège et administrateur de plusieurs sociétés publiques et privées.

**Hermès**  
**Science**  
PUBLICATIONS

